

## Численное исследование аэродинамики топочной среды в жаротрубном котле типа “Турботерм”\*

Хаустов С. А., инж., Заворин А. С., доктор техн. наук

Томский политехнический университет

Выполнено численное моделирование турбулентного диффузионного факела метановоздушного пламени в жаровой трубе котла типа “Турботерм” номинальной мощностью 500 кВт. Исследования проводили с помощью пакета прикладных программ ANSYS Fluent 12.1.4. Достоверность выбранной математической модели подтверждена натурными испытаниями. Расчетным путем получена подробная картина параметров топочной среды при сжигании природного газа. Графически проиллюстрированы линии тока и векторное поле скоростей топочной среды. В табличном виде приведены значения средней массовой скорости топливоздушной смеси в приосевой зоне факела, скорости движения прямого и обратного хода топочной среды. Отмечен ряд особенностей аэродинамики в жаровых трубах с реверсивным факелом.

**Ключевые слова:** численное моделирование, жаротрубный котел, горелка, тупиковая жаровая труба, аэродинамика.

Проектирование распространенных в системах автономного теплоснабжения жаротрубных котлов малой мощности не обеспечено нормативно-расчетной базой. Использование для этого нормативного метода, разработанного и проверенного с целью расчетов крупных (энергетических) котлоагрегатов [1], не позволяет получать приемлемые результаты. Поэтому при решении задач по конструированию жаротрубных котлов все чаще применяется математическое моделирование. И здесь основополагающее значение имеет выявление особенностей топочной аэродинамики и ее количественных параметров.

Для численного моделирования выбрана конструкция жаротрубной топки котла “Турботерм-500” номинальной мощностью 500 кВт (рис. 1). Он имеет тупиковую жаровую топку 1, в тыльной части которой происходит раз-

ворот факела на 180° по направлению к передней крышке 7 котла. Затем продукты сгорания поступают в поворотную камеру 3, где вновь разворачиваются на 180° и направляются в дымогарные трубы 4, погруженные в водяной объем 6, после чего поступают в сборный дымовой короб 5, а из него — в газоход и дымовую трубу.

Топка находится под наддувом с расчетным давлением 200 Па, которое позволяет преодолеть аэродинамическое сопротивление газового тракта внутри котла. Топливоздушная смесь в топку поступает за счет дутья, создаваемого вентилятором, встроенным в горелочное устройство 2. Длина топки по центральной оси от устья горелки до днища — 1800 мм, внутренний диаметр — 884 мм.

Исследования проводили с помощью пакета прикладных программ ANSYS Fluent 12.1.4. К рассмотрению принята полная геометрическая модель топки, включая канал горелки и

\* Работа выполнена в рамках госзадания по НИР 7.3275.2011.

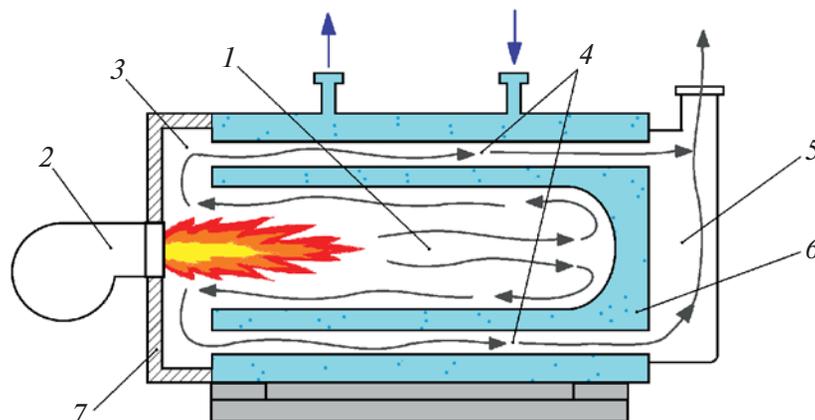


Рис. 1. Конструктивная схема жаротрубного котла

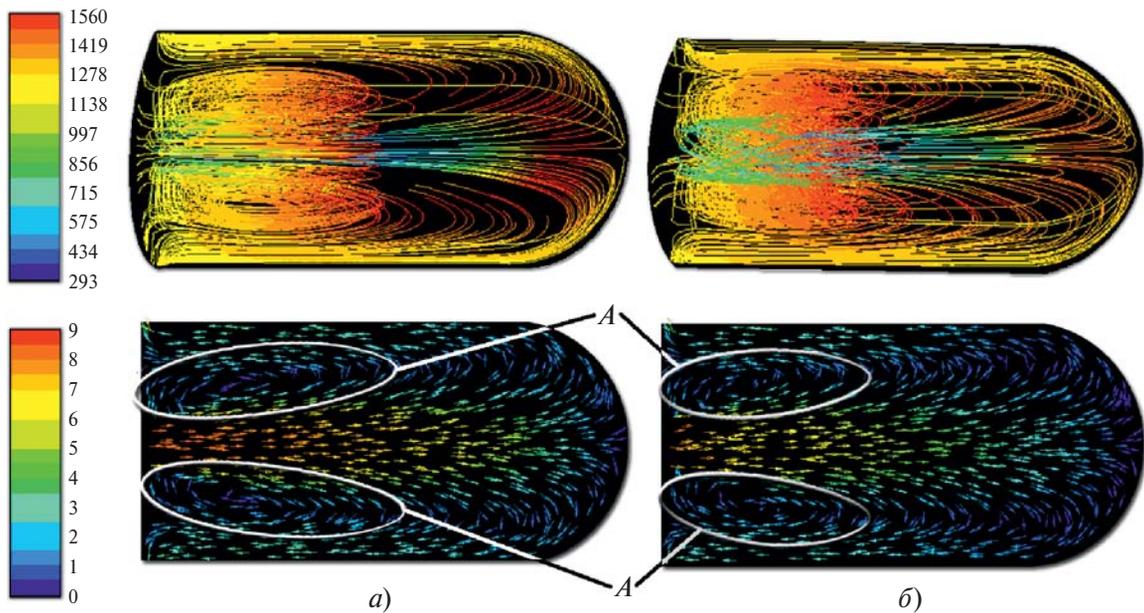


Рис. 2. Линии тока с цветовой индексацией по температуре топочной среды, К, и векторное поле скоростей топочной среды с цветовой индексацией по значениям скорости, м/с, для прямоточной (а) и вихревой (б) горелок:

A — зоны рециркуляции части продуктов сгорания

поворотную камеру на входе в конвективный пучок котла. Построение расчетной сетки выполнено средствами ANSYS Workbench на основе чертежей котла. Методом конечных элементов моделировали следующие процессы и явления: горение метана в кислороде воздуха, турбулентность в реагирующей среде, конвективный и лучистый теплообмен. Предполагалось, что окисление горючего протекает необратимо и в две стадии:  $2\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 = 2\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O}$ ;  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ . Моделирование газовой фазы выполняли в приближении Эйлера. Лучистый теплообмен рассчитывали методом сферических гармоник в первом приближении (так называемая P1-модель). Используемые в данной модели радиационного теплопереноса дифференциальные уравнения приведены в [2].

Применяемая модификация RNG  $k-\varepsilon$ -модели турбулентности хорошо зарекомендовала себя в задачах с сильной кривизной линий тока. Данная модель справедлива для полностью развитого турбулентного течения, т. е. для больших чисел Рейнольдса, когда прямое влияние вязкости на структуру турбулентности пренебрежимо мало. Достоверность математической модели подтверждена натурными испытаниями [3].

В качестве исходных данных для расчета принимали: топливо — метан (100 %), окислитель — кислород воздуха, теоретически необходимый объем воздуха для полного сгорания —  $9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , коэффициент избытка

воздуха — 1,03, массовый расход топливовоздушной смеси — 0,2 кг/с, ее температура — 293 К (равна температуре воздуха в помещении котельной), средняя температура теплоносителя — 365,7 К.

Результаты численного эксперимента показывают, что протекающие в топке процессы симметричны относительно оси горелки. Линии тока топочной среды (рис. 2) демонстрируют, что она дважды меняет направление своего движения. Свежая топливовоздушная смесь, двигаясь по направлению к тыльной части топки, разогревается, воспламеняется и сгорает. Затем продукты сгорания направляются от центра топочной камеры к ее периферии, и, наконец, дымовые газы вдоль стенки жаровой трубы возвращаются к фронту котла, где покидают топочную камеру. Таким образом, по аэродинамической структуре можно выделить три области: собственно факел, область разворота и возвратный ход дымовых газов.

Факел занимает приосевую зону жаровой трубы, воспламенение происходит с наружной границы топливовоздушной струи. Контурный график массовой доли метана, приведенный в [3], позволяет оценить геометрические размеры (дальнобойность) факела: длина — 1550 мм (примерно 86 % длины топочной камеры), максимальный диаметр занимаемой факелом зоны — 450 мм (около 51 % диаметра жаровой трубы). Средняя линейная скорость движения топочной среды в приосевой

Координата по длине топки, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
Средняя скорость движения топочной среды в приосевой зоне факела, м/с	8	7,8	7,3	6,8	6,5	6,2	4	2,1
Средняя массовая скорость прямого движения топочной среды в приосевой зоне факела, кг/с	0,27	0,25	0,22	0,2	0,17	0,15	0,11	0,06
Скорость обратного хода дымовых газов, м/с	2,8	3,2	3,2	2,9	2,4	1,9	1,4	1,1

зоне факела (см. таблицу) уменьшается по длине топки вследствие аэродинамического торможения с 8 м/с на выходе из горелки почти до нуля вблизи днища жаровой трубы.

В пристеночной зоне топки, где горячие продукты сгорания проходят по периферии жаровой трубы в направлении от тыла к фронту, толщина потока дымовых газов составляет 130 – 135 мм. В расчетной практике принято считать днище топки точкой разворота пламени и началом первого хода дымовых газов. Однако линии тока и векторное поле скоростей (см. рис. 2) топочной среды показывают, что разворот продуктов сгорания идет почти по всей длине факела.

Скорость течения продуктов сгорания вдоль стенки жаровой трубы (см. таблицу) увеличивается с 1,1 м/с в точке полного разворота факела (1,55 м по длине топочной камеры) до максимума (3,2 м/с) на расстоянии 0,5 м от фронта топки. Причина этого — нарастание объемного расхода движущихся по периферии дымовых газов в результате постоянного смешивания их с покидающими факел горячими продуктами сгорания. Непосредственно перед входом в поворотную камеру дымовые газы охлаждаются до температуры на выходе из топки (1180 К) [3], и их скорость движения снижается до 2,8 м/с.

На входе в топку образуются зоны с отрицательным давлением, что приводит к образованию вихрей раскаленных топочных газов, рециркулирующих к устью горелки (см. рис. 2). Часть дымовых газов после разворота не покидает топку, а возвращается к горелке и перемешивается со свежей поступающей в топку топливоздушной смесью. Таким образом, в топках с реверсивным факелом с наружной образующей топливоздушной струи создается зона рециркуляции части продуктов сгорания к корню факела. В плоскости осевого сечения жаровой трубы эта зона представлена эллиптическими вихрями по обе стороны от факела (см. рис. 2). Диаметр по малой оси эллипса равен 225 мм, диаметр по большой оси — 780 мм, центр

эллипса находится на расстоянии 250 мм от центральной оси топки. В пространстве же — это единый вихрь тороидальной формы, ось вращения которого совпадает с центральной осью горелки (рис. 3).

В зоне рециркуляции кинетическая энергия турбулентности топочной среды достигает своего наибольшего значения —  $5,72 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Частота вращения рециркулирующего к устью горелки вихря — около  $2,5 \text{ с}^{-1}$ . Массовый расход газов в вихре равен 0,057 кг/с, что соответствует 30 % массы топливоздушной смеси, поступающей через горелку.

Топочная среда в зоне рециркуляции состоит из горячих продуктов сгорания: углекислого газа, азота и его оксидов, водяных паров. Их температура близка к температуре в ядре факела и превышает 1200 К (см. рис. 2). Поэтому свежая топливоздушная смесь, смешиваясь с рециркулирующими газами, почти сразу нагревается до 545 К.

При использовании прямоточной горелки зона рециркуляции занимает по длине топочной камеры около 45 % (см. рис. 2, а). При применении вихревых горелок ее длина несколько уменьшается (см. рис. 2, б), а топочная среда в зоне рециркуляции приобретает некоторую тангенциальную составляющую скорости относительно оси горелки. Поскольку в топках данного типа параметр крутки потока с целью исключения затягивания пламени в конвективный пучок лимитируется значением  $n = 1,4$  [3], можно определить максимально возможную тангенциальную скорость рециркулирующих продуктов сгорания. При использовании вихревых горелок с параметром крутки 1,4 она составляет 2,2 м/с.

Как было отмечено, дымовые газы покидают факел, смешаясь в пристеночную зону. Результаты моделирования позволяют количественно оценить распределение массового расхода в области разворота дымовых газов. Из данных таблицы видно, что массовый расход покидающих факел дымовых газов увеличивается по длине топочной камеры.

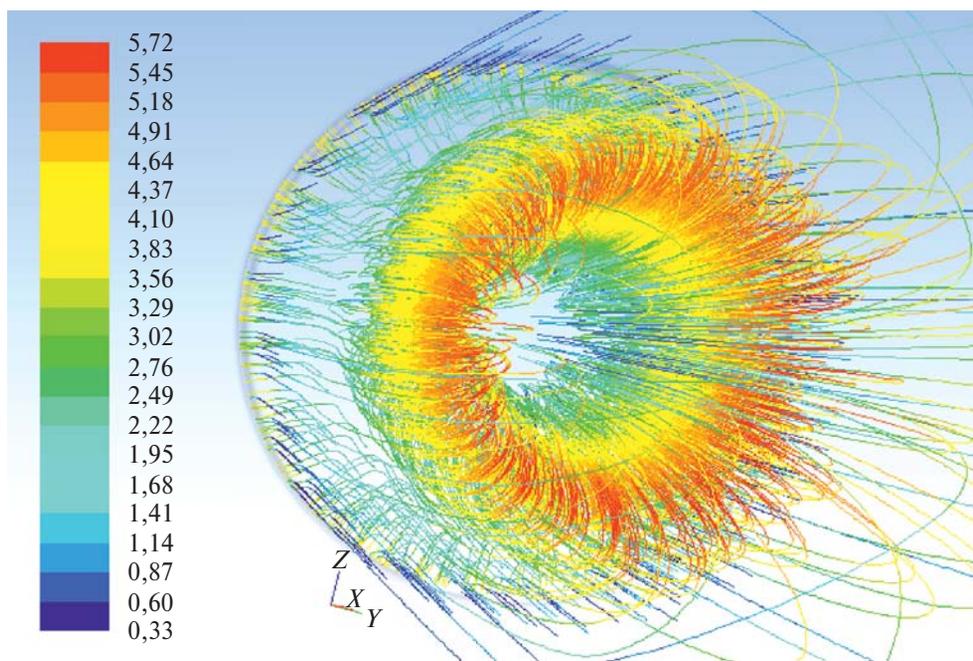


Рис. 3. Пространственное изображение линий тока в зоне рециркуляции с цветовой индексацией по кинетической энергии турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}^2$

На расстоянии до 300 мм за горелкой в результате смешивания свежей топливоздуш- ной смеси с рециркулирующими дымовыми газами массовая скорость топочной среды в приосевой зоне факела возрастает с 0,2 до 0,257 кг/с, затем по мере выгорания топлива уменьшается на 76 % — до 0,061 кг/с. Остальные 24 % продуктов сгорания достигают днища жаровой трубы и разворачиваются в тыльной ее части на расстоянии 1,6 – 1,8 м от горелки, где уже не протекают процессы горения.

Таким образом, с использованием пакета прикладных программ ANSYS получена подробная картина параметров топочной среды котла типа “Турботерм” при сжигании природного газа, пригодная для качественного анализа особенностей аэродинамики в жаровых трубах с реверсивным факелом. В частности, применительно к исследуемой конструкции установлено, что разворот продуктов

сгорания идет почти по всей длине топки, а с наружной образующей топливоздушной струи создается зона рециркуляции части продуктов сгорания к корню факела. Для дальнейшего совершенствования методики проектирования жаротрубных котлов требуется установить зависимость тепловых и аэродинамических параметров топочной среды от конструктивных и режимных характеристик топочного устройства.

#### Список литературы

1. **Тепловой** расчет котлов (нормативный метод). — СПб.: НПО ЦКТИ, 1998.
2. **Тайлашева Т. С.** Моделирование топочной среды в котле типа ДКВР при сжигании природного газа. — Изв. Томск. политехн. ун-та, 2009, № 4.
3. **Хаустов С. А., Заворин А. С., Фисенко Р. Н.** Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом. — Изв. Томск. политехн. ун-та, 2013, № 4.

**khaustovSA@tpu.ru**